

Н. М. ПАНИН

ПЕРЕМЕННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 759

Н. М. ПАНИН

ПЕРЕМЕННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1971

6Ф2.08
П 16
УДК 621.372.852.3

Панин Н. М.

П 16 Переменные аттенюаторы и их применение. М., «Энергия», 1971.

40 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 759).

Рассмотрены переменные аттенюаторы (ослабители), методика их расчета и практического применения. Приводится простая конструкция переменного аттенюатора, работающего в диапазоне частот от 0 до 150 *Мгц* и пригодного для изготовления в любительских условиях.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

$\frac{3\text{-}4\text{-}5}{341\text{-}70}$ 6Ф2.08

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей книги является ознакомление радиолюбителей с устройством и практическим применением переменных аттенюаторов в измерительной аппаратуре. Они применяются также и в других областях электроники, в частности в аппаратуре проводной и радиорелейной связи. Различные типы этих приборов работают во всех диапазонах частот, используемых современной радиоэлектроникой, начиная с постоянного тока и кончая десятками и сотнями гигагерц.

Лучшие современные аттенюаторы отличаются высокими техническими характеристиками, удобством эксплуатации, малым весом, небольшими размерами, простотой конструкции и невысокой стоимостью.

Все эти качества обусловили широкое распространение переменных аттенюаторов и как самостоятельных измерительных приборов, и как компонентов измерительной аппаратуры. Причем применение переменных аттенюаторов в генераторах и измерителях амплитудно-частотных характеристик (ИАЧХ) значительно расширяет возможности этих приборов

Частоты, с которыми практически имеют дело радиолюбители, обычно не превышают 500 *Мгц*. Напомним в связи с этим, что промежуточная частота телевизионного приемника составляет 38 *Мгц*, максимальная частота телевизионного сигнала в 12-м канале — 230 *Мгц*. Любительские радиостанции СССР работают на частотах приблизительно до 500 *Мгц*.

Учитывая сказанное, а также историческую тенденцию развития электроники по пути освоения все более высоких частот, что связано, в частности, с перегруженностью уже освоенных диапазонов и новыми перспективами, которые открываются при работе на более высоких частотах, основное внимание в брошюре уделено аттенюаторам, предназначенным для диапазона частот до 1 *Ггц*.

Наиболее перспективными в этом диапазоне в связи с успехами, достигнутыми в последнее время в области технологии производства высокостабильных тонкопленочных ультравысокочастотных резисторов, являются переменные аттенюаторы на резисторах. Кроме того, аттенюаторы этого типа имеют простую конструкцию и легко могут быть выполнены радиолюбителями любой квалификации. Поэтому эти аттенюаторы описаны наиболее полно. Предельные аттенюаторы рассмотрены вместе с емкостными и индуктивными. Аттенюаторы других типов, имеющие более ограниченное применение или предназначенные для работы в более высокочастотных диапазонах (т. е. свыше 1 *Ггц*), либо изложены весьма кратко, либо (как, например, поляризационные) опущены вовсе. Применение переменных

аттенюаторов ввиду ограниченного объема книги показано в основном на примере их использования для измерения усиления и затухания. Другие возможности аттенюаторов рассмотрены очень кратко Тем не менее автор надеется, что данная книга будет полезна читателю как в смысле более глубокого понимания методов измерений и принципов построения измерительной аппаратуры, так и при практической работе.

1. НАЗНАЧЕНИЕ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АТТЕНЮАТОРОВ

Аттенюатором[1] (ослабителем) называется устройство, предназначенное для уменьшения (ослабления) в требуемое число раз электрической мощности, а следовательно, напряжения и тока, поступающих от источника сигнала в нагрузку.

Аттенюаторы подразделяются на постоянные (их называют также фиксированными), у которых ослабление не может быть изменено, и переменные. У переменных аттенюаторов величина ослабления может регулироваться в определенных пределах. Принцип действия однотипных постоянных и переменных аттенюаторов один и тот же. Однако переменные аттенюаторы отличаются от постоянных более сложной конструкцией, что обусловлено наличием у них механизма управления ослаблением и отсчетного устройства, по которому определяется величина ослабления. Переменный аттенюатор, естественно, заменяет любой постоянный с ослаблением, равным ослаблению, которое может быть установлено по отсчетному устройству переменного аттенюатора.

Переменные аттенюаторы применяются как в качестве самостоятельных приборов, так и в составе радиоизмерительной аппаратуры. В связи с этим некоторые типы аттенюаторов выпускаются в двух вариантах: как отдельные приборы для самостоятельных измерений и как приборы, предназначенные для встраивания в другую аппаратуру (например, аттенюаторы Д2-22 и Д2-22/1). Способность аттенюаторов изменять величину электрического сигнала в требуемое число раз позволяет использовать их в самых разнообразных приборах и измерительных схемах. Применяются переменные аттенюаторы главным образом для следующих целей·

1. Изменение и отсчет уровня (напряжения или мощности) сигнала на выходе генераторов, измерителей амплитудно-частотных характеристик и пр.
2. Измерение усиления, затухания[2] (ослабления), а также неравномерности амплитудно-частотной характеристики.
3. Регулирование усиления и затухания.
4. Улучшение согласования и развязки
5. Измерение чувствительности и коэффициента шума.
6. Калибровка измерителей мощности и высокочастотных милливольтметров.
7. Расширение пределов высокочастотных измерителей мощности.

---

[1] Наиболее употребительное название — «аттенюатор»; термин «ослабитель» является переводом латинского слова «аттенюатор».
[2] Понятия «затухание» и «ослабление» равнозначны.

8. Измерение нелинейности.
9. Измерение параметров антенн.

Переменные аттенюаторы встраиваются в подавляющее большинство генераторов сигналов и ИАЧХ. Это позволяет не только регулировать в больших пределах уровень сигнала на их выходе, но и знать величину этого сигнала, а также производить измерение усиления или затухания, используя в качестве отсчетного прибора аттенюатор генератора или ИАЧХ. Если отсчетная система аттенюатора позволяет фиксировать изменения затухания на несколько процентов (на несколько десятых долей децибела), то по его шкале можно оценивать и неравномерность АЧХ усилителей, фильтров и т. п.

Переменный аттенюатор, как правило, является обязательным функциональным узлом таких приборов, как измерители напряженности поля и помех, измерительные приемники и измерители коэффициента шума. Кроме того, они находят применение в измерительных усилителях, фазометрах, измерителях времени запаздывания и других приборах.

Рассмотрим классификацию аттенюаторов. По принципу действия переменные аттенюаторы можно разделить на следующие:
1. Аттенюаторы на резисторах.
2. Предельные.
3. Емкостные и индуктивные.
4. Поглощающие.
5. Поляризационные.

Принцип действия переменных аттенюаторов на резисторах основан на изменении гальванической (резистивной) или комбинированной (резистивно-емкостной) связи между входом и выходом аттенюатора. Принцип действия предельного аттенюатора основан на использовании явления затухания электромагнитных волн в запредельном волноводе, что обеспечивается выбором размеров поперечного сечения волновода, а также типа возбуждающего и воспринимающего электрода. Установка необходимой величины ослабления производится изменением электрической (емкостной) или магнитной (индуктивной) связи между этими электродами путем регулирования (в небольших пределах) расстояния между ними и, следовательно, длины волновода.

Аттенюаторы емкостного и индуктивного типа в электрическом отношении эквивалентны предельным, отличаются от них чисто конструктивными признаками и могут рассматриваться как частный случай последних. Основное отличие предельных аттенюаторов, а также аттенюаторов емкостного и индуктивного типа от аттенюаторов на резисторах (при чисто резистивной связи) состоит в том, что связь по постоянному току между входом и выходом всегда отсутствует.

В поглощающем аттенюаторе изменение ослабления достигается посредством введения в отрезок волновода или коаксиального кабеля материала, поглощающего мощность электромагнитной волны. Иногда это достигается изменением положения поглощающего материала в волноводе.

Существуют и другие классификации аттенюаторов. Так, в зависимости от конструкции соединительной линии (линии передачи), подключаемой ко входу и выходу аттенюатора, с помощью которой он связывается с другими приборами или элементами схемы, аттенюаторы делятся на следующие:

1. Симметричные (относительно земли)
2. Коаксиальные.
3. Волноводные.

В соответствии с типом подключаемой к аттенюатору соединительной линии вход и выход аттенюатора является симметричным, коаксиальным или волноводным.

Симметричные аттенюаторы предназначены для работы с симметричными линиями, которые в свою очередь рассчитаны на подключение к устройствам, симметричным относительно земли. К таким устройствам относятся, например, рамочные и дипольные антенны, входы некоторых измерителей поля, часть оборудования аппаратуры уплотнения и пр. Так как подавляющее большинство устройств является несимметричными относительно земли, аттенюаторы этого типа имеют ограниченное применение. Кроме того, симметричный экранированный кабель (двухпроводная экранированная линия) дороже коаксиального кабеля, а применение неэкранированной симметричной линии (например, шнура, свитого из двух изолированных проводов) иногда становится невозможным уже на частотах звукового диапазона из-за взаимного влияния между соединительными линиями, подключенными ко входу и выходу аттенюатора.

Это влияние тем больше, чем выше частота сигнала, чем больше длина линии и чем ближе одна линия к другой. Оно не имеет большого значения при малых ослаблениях аттенюатора, но оказывается весьма существенным при увеличении затухания аттенюатора, особенно когда это затухание очень велико. При этом фактическое ослабление сигнала между входом и выходом оказывается всегда меньше, чем это следует из величины затухания, установленной на аттенюаторе, что приводит к большим погрешностям измерений.

Аттенюаторы коаксиального типа являются самыми распространенными в диапазоне частот от 0 до 1 *Ггц*, а коаксиальный кабель (коаксиальная соединительная линия) — наиболее удобным для работы в указанном диапазоне. Он имеет хорошую экранировку и пригоден для передачи электрических сигналов, начиная с постоянного тока и до частот в несколько тысяч мегагерц. Хотя затухание коаксиального кабеля, как и любой соединительной линии, возрастает с увеличением частоты, но на частотах примерно до 0,5 *Ггц* при длине кабеля около метра (а именно такой длины кабели и используются при измерениях) оно пренебрежимо мало. Однако на частоте 3 *Ггц* это затухание увеличивается приблизительно до 1 *дб/м*, а на частоте 10 *Ггц* — до 2 *дб/м*. Поэтому на частотах больше 1 *Ггц* тракт передачи электрического сигнала строится на основе волноводной линии, которая имеет меньшее затухание, чем коаксиальная, причем различие в затухании быстро увеличивается с ростом частоты. Для работы с такой линией используются волноводные аттенюаторы, которые, так же как и сама линия, применяются на частотах больше 1 *Ггц*, так как на более низких частотах размеры поперечного сечения волновода становятся недопустимо большими, а полоса рабочих частот сильно сужается. Кроме того, волноводы являются самой дорогой и чрезвычайно громоздкой линией передачи.

Переменные аттенюаторы в зависимости от того, как изменяется их затухание, разделяются на плавные и ступенчатые.

По точности установленной величины затухания переменные аттенюаторы классифицируют на прецизионные, измерительные (отсчетные) и грубые (развязывающие). Прецизионные представ-

ляют собой высокоточные (образцовые) аттенюаторы, предназначенные для поверки измерительных аттенюаторов и других приборов. Самыми распространенными являются измерительные аттенюаторы, точность которых вполне достаточна для проведения измерений. Грубые аттенюаторы имеют ограниченное применение. Они используются для грубой регулировки уровня сигнала, а также для улучшения согласования (развязки).

2. ВАЖНЕЙШИЕ СВОЙСТВА ПЕРЕМЕННЫХ АТТЕНЮАТОРОВ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В электрическом отношении аттенюатор независимо от его типа удобно рассматривать как четырехполюсник (рис. 1), т. е. устройство, имеющее два входных и два выходных зажима (полюса). Под входными зажимами аттенюатора понимают зажимы, подключаемые к источнику сигнала ($\dot{E}_г$, $Z_г$), например к генератору, а под выходными — подключаемые к нагрузке ($Z_н$). Сопротивление, измеренное с входных зажимов, при отключенном источнике сигнала называется входным ($Z_{вх}$). Сопротивление, измеренное с выходных зажимов при отключенной нагрузке, называется выходным ($Z_{вых}$). Если входное сопротивление четырехполюсника равно выходному при равных нагрузках на входе и выходе, т. е. $Z_г = Z_н$, то такой четырехполюсник называется симметричным. Аттенюаторы являются симметричными четырехполюсниками с характеристическим параметрами R_0 и g. Для любого симметричного пассивного[1] четырехполюсника, в частности аттенюатора, согласно теории четырехполюсников можно написать следующую систему уравнений:

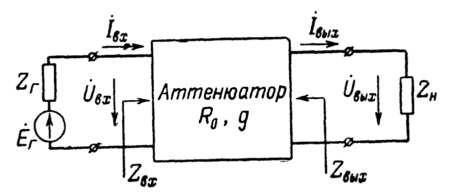


Рис. 1. Аттенюатор как четырехполюсник.

$$\begin{cases} \dot{U}_{вх} = \dot{U}_{вых} \operatorname{ch} g + \dot{I}_{вых} R_0 \operatorname{sh} g; & (1) \\ \dot{I}_{вх} = \dfrac{\dot{U}_{вых}}{R_0} \operatorname{sh} g + \dot{I}_{вых} \operatorname{ch} g. & (2) \end{cases}$$

Приняв во внимание, что $\dot{U}_{вых}/\dot{I}_{вых} = Z_н$, на основании уравнения (1) можно установить связь между входным и выходным напряжением:

$$\dot{U}_{вх} = \dot{U}_{вых}\left(\operatorname{ch} g + \frac{R_0}{Z_н} \operatorname{sh} g\right), \quad (3)$$

а на основании уравнения (2) — связь между входным и выходным током:

$$\dot{I}_{вх} = \dot{I}_{вых}\left(\operatorname{ch} g + \frac{Z_н}{R_0} \operatorname{sh} g\right). \quad (4)$$

---

[1] Пассивным называется четырехполюсник, внутри которого отсутствуют источники электрической энергии.

Разделив уравнение (3) на уравнение (4) и проделав элементарные преобразования, получим выражение для входного сопротивления аттенюатора:

$$Z_{вх} = \frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{I}_{вх}} = R_0 \frac{\frac{Z_н}{R_0} + \operatorname{th} g}{1 + \frac{Z_н}{R_0} \operatorname{th} g}, \quad (5)$$

т. е. входное сопротивление аттенюатора определяется не только его характеристическими параметрами, но и величиной нагрузочного сопротивления $Z_н$. Как уже было отмечено выше, при одинаковых нагрузках входное и выходное сопротивления аттенюаторов равны между собой, поэтому по аналогии с выражением (5), заменив в нем $Z_н$ на $Z_г$, можно написать выражение для выходного сопротивления аттенюатора:

$$Z_{вых} = R_0 \frac{\frac{Z_г}{R_0} + \operatorname{th} g}{1 + \frac{Z_г}{R_0} \operatorname{th} g}. \quad (6)$$

Ток и напряжение на входе аттенюатора согласно закону Ома равны:

$$\dot{I}_{вх} = \frac{\dot{E}_г}{Z_г + Z_{вх}}; \quad (7)$$

$$\dot{U}_{вх} = \frac{\dot{E}_г Z_{вх}}{Z_г + Z_{вх}}. \quad (8)$$

Из полученных соотношений видно, что, зная параметры источника сигнала ($\dot{E}_г$, $Z_г$ — э. д. с. и сопротивление генератора), сопротивление нагрузки $Z_н$, а также параметры аттенюатора R_0 и g, можно найти интересующие нас значения токов, напряжений, мощностей и сопротивлений. Однако в диапазоне частот приблизительно до 1 *Ггц* наиболее употребительным является напряжение (а не ток или мощность) *. Так, например, усиление и ослабление в указанном диапазоне чаще всего выражаются через отношение напряжений. Объясняется это тем, что до частоты 1 *Ггц* проще измерить напряжение, чем ток или мощность, о чем и свидетельствует распространенность высокочастотных вольтметров; поэтому в дальнейшем изложении мы ограничимся рассмотрением напряжений и сопротивлений. Что касается токов и мощностей, то в случае необходимости они легко могут быть рассчитаны на основании закона Ома и формулы электрической мощности.

Параметры R_0 и g являются собственными (характеристическими) параметрами аттенюатора, так как они, как будет показано ниже (соотношения 11 и 12), определяются только свойствами самого аттенюатора и не зависят от его нагрузки.

* На частотах свыше 1 *Ггц* принято оперировать понятием «мощность».

Действительно, входное сопротивление аттенюатора согласно выражению (5) при коротком замыкании на выходе ($Z_н=0$) равно:

$$Z_{к.з}=R_0\,\mathrm{th}\,g, \qquad (9)$$

а при холостом ходе на выходе ($Z_н\to\infty$)

$$Z_{x.x}=R_0\,\mathrm{cth}\,g. \qquad (10)$$

Перемножив выражения (9) и (10), получим $Z_{к.з}Z_{x.x}=R_0^2$, откуда

$$R_0=\sqrt{Z_{к.з}Z_{x.x}}. \qquad (11)$$

Разделив выражения (9) на (10), имеем $Z_{к.з}/Z_{x.x}=\mathrm{th}^2\,g$, откуда

$$\mathrm{th}\,g=\sqrt{\frac{Z_{к.з}}{Z_{x.x}}}. \qquad (12)$$

Параметр R_0 получил название волнового (характеристического) сопротивления, а параметр g — собственной (характеристической) постоянной передачи

Волновое сопротивление аттенюатора, определяемое только внутренними его параметрами, — это такое сопротивление R_0, как это видно из формул (5) и (6), при нагрузке на которое обеспечивается режим согласования на входе и выходе аттенюатора, т. е. входное и выходное сопротивления аттенюатора равны R_0 (рис. 2).

Если принять во внимание, что $\mathrm{ch}\,g=\frac{e^g+e^{-g}}{2}$ и $\mathrm{sh}\,g=\frac{e^g-e^{-g}}{2}$ (по определению гиперболических функций косинуса и синуса), то путем несложных преобразований на основании уравнения (3) можно показать, что постоянная передачи в общем случае равна:

$$g=a+j\alpha, \qquad (13)$$

где a — собственное (характеристическое) затухание; α — собственная (характеристическая) фазовая постоянная, причем собственная фазовая постоянная представляет собой сдвиг фаз между напряжением на входе и напряжением на выходе аттенюатора при условии, что он нагружен на сопротивление, равное волновому (рис. 2). Поскольку фазовый сдвиг обычно не является существенным, далее отношение двух напряжений будет рассматриваться без учета фазового сдвига между ними.

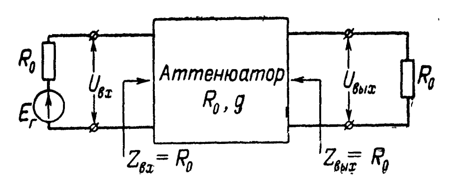


Рис. 2. Аттенюатор, работающий в режиме согласования на входе и выходе.

В паспортах на аттенюаторы собственная фазовая постоянная не оговаривается, так как при работе аттенюатора на согласованную нагрузку, т. е. на сопротивление, равное волновому ($Z_н=R_0$), фазовая постоянная влияет только на сдвиг фаз между напряжением на входе и выходе аттенюатора. Если же аттенюатор работает на несогласованную нагрузку ($Z_н\neq R_0$), то, как следует из выражения (3), фазовая постоянная (если она, конечно, не равна

нулю) влияет также и на величину отношения этих напряжений. Однако и в этом случае, как будет показано в § 5, можно исключить влияние фазовой постоянной.

В общем случае под затуханием K понимают отношение входного напряжения к выходному, выраженное в логарифмических единицах — неперах или децибелах. Собственное (характеристическое) затухание является частным случаем более общего понятия «затухание» и представляет собой затухание, определенное при условии согласования на выходе, т. е. при $Z_н=R_0$.

Если затухание выражено в неперах (*неп*), то

$$a = \ln \frac{U_{вх}}{U_{вых}} = \ln K, \qquad (14)$$

если в децибелах (*дб*), то

$$b = 20 \lg \frac{U_{вх}}{U_{вых}} = 20 \lg K. \qquad (15)$$

Отсчетное устройство аттенюатора градуируется при $Z_н=R_0$, т. е. оно показывает собственное затухание аттенюатора.

При $Z_н=R_0$, как это следует из выражения (3), величина K определяется непосредственно из соотношения (14), если аттенюатор градуирован в неперах, или из соотношения (15) — при градуировке аттенюатора в децибелах. При $Z_н \neq R_0$ затухание аттенюатора не равно собственному затуханию и тогда K определяется из выражения (3), после чего затухание аттенюатора рассчитывается по формулам (14) или (15).

Применение непер и децибел для выражения величин затухания, усиления и др. объясняется большим удобством, так как позволяет заменить операции умножения и деления операциями сложения и вычитания. В неперах преимущественно градуируются переменные аттенюаторы, работающие до частот около нескольких мегагерц, т. е. в технике проводной связи. Переменные аттенюаторы, предназначенные для работы на более высоких частотах, градуируются в децибелах.

Это различие вызвано в основном историческими причинами и принципиального значения не имеет. И все же в настоящее время децибелы являются более употребительными, чем неперы, и большинство аттенюаторов градуируется в децибелах.

Из выражений (14) и (15) следует соотношение между непером и децибелом:

$$a=0{,}115b, \qquad (16)$$

откуда видно, что, например, 1 *дб* соответствует 0,115 *неп*, 20 *дб* — 2,3 *неп*, а 1 *неп* равен 8,69 *дб*.

Далее под затуханием аттенюатора будет пониматься затухание, установленное по его отсчетному устройству, т. е. собственное затухание аттенюатора [1].

Переменные аттенюаторы конструируют таким образом, чтобы их волновое сопротивление равнялось волновому сопротивлению

[1] Иногда понятием «затухание аттенюатора» пользуются как для обозначения собственного затухания, так и для обозначения затухания при нагрузке, не равной R_0. Если при этом о нагрузке не упоминается, то речь идет о собственном затухании аттенюатора.

соединительной линии[1], на подключение к которой они рассчитаны, и не изменялось при изменении затухания аттенюатора. Таким образом обеспечивается режим согласования аттенюатора и соединительной линии при любом затухании аттенюатора.

Поскольку волновое сопротивление симметричных и коаксиальных линий является постоянным и чисто активным, то и волновое сопротивление аттенюатора в рабочем диапазоне частот должно быть чисто активным и не зависеть от частоты. Большинство коаксиальных кабелей имеет волновое сопротивление 75 или 50 *ом*, поэтому и коаксиальные аттенюаторы выпускаются с таким сопротивлением. По тем же причинам волновое сопротивление симметричных аттенюаторов составляет 600 или 135 *ом*. Для волноводных аттенюаторов вместо волнового сопротивления принято указывать поперечные размеры волновода.

Подытоживая сказаноне о свойствах аттенюаторов, отметим:

1. Входное сопротивление аттенюатора при любом затухании равно R_0, если $Z_н=R_0$ [формула (5)].

2. Выходное сопротивление аттенюатора при любом затухании равно R_0, если $Z_г=R_0$ [формула (6)].

3. При затухании аттенюатора 20 *дб* (2,3 *неп*) и более входное и выходное сопротивления аттенюатора равны R_0, с погрешностью не более 2% при любом $Z_н$ или $Z_г$[2].

4. При $Z_н=R_0$ соотношение K между напряжениями на входе и выходе аттенюатора определяется из формулы (14), если аттенюатор градуирован в неперах, или из формулы (15), если аттенюатор градуирован в децибелах.

Практически это делается с помощью таблиц, построенных в соответствии с этими формулами (см. § 5).

5. Если $Z_н \neq R_0$, то величина K может быть вычислена по формуле (3), если известна фазовая постоянная α аттенюатора. Поскольку надежных сведений о величине фазовой постоянной чаще всего нет, то обычно применяются иные методы, которые будут рассмотрены в § 5.

В паспортах аттенюаторов кроме классификационных параметров (принцип действия, тип подключаемой линии, точность и плавность регулировки затухания) приводятся следующие технические характеристики:

1. Частотный диапазон.

2. Номинальные входное и выходное сопротивления (имеется в виду при нагрузке противоположного конца аттенюатора на R_0) или номинальное волновое сопротивление.

3. Максимальное отклонение входного и выходного (или волнового) сопротивлений от номинальной величины.

4. Пределы изменения затухания и регулировочная характеристика аттенюатора. Приводятся данные о минимальном и максимальном затухании аттенюатора (пределы регулировки), а также число ступеней и затухание ступеней (для аттенюаторов со ступенчатой регулировкой затухания).

---

[1] Соединительную линию можно рассматривать так же, как симметричный пассивный четырехполюсник, и, следовательно, она полностью может быть охарактеризована параметрами R_0 и g. Для нее справедливы также приведенные выше соотношения (1)—(16).

[2] Это видно из соотношений (5) и (6), так как при затухании 20 *дб* (2,3 *неп*) и более $\operatorname{th} g \approx 1$, поэтому $Z_{вх} \approx R_0$ и $Z_{вых} \approx R_0$.

5. Погрешность затухания. Обычно приводится общая погрешность затухания, реже — ее составляющие: основная и частотная.

6. Наибольшая мощность на выходе аттенюатора. По величине этой мощности и волновому сопротивлению определяется допустимое максимальное напряжение на входе аттенюатора.

7. Размеры.

8. Вес.

9. Условия эксплуатации.

Перечисленные выше технические характеристики аттенюаторов не требуют особого пояснения, за исключением пункта 3.

По причинам принципиального и технологического порядка входное и выходное сопротивление (или волновое сопротивление) несколько отличается от номинального в зависимости от затухания аттенюатора и частоты, а также от прибора к прибору. В паспортах на аттенюаторы максимально возможное отклонение значений входного, выходного или волнового сопротивления от номинала выражено через затухание несогласованности

$$b_н = 20 \lg \left| \frac{Z + R_0}{Z - R_0} \right| \qquad (17)$$

или через коэффициент стоячей волны (КСВ)

$$s = \frac{|Z + R_0| + |Z - R_0|}{|Z + R_0| - |Z - R_0|}. \qquad (18)$$

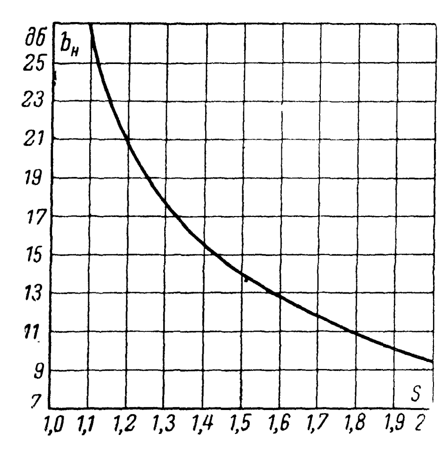


Рис. 3. Связь между затуханием несогласованности и КСВ.

В этих формулах Z — входное, выходное или волновое сопротивление аттенюатора, соответствующее максимальному его отклонению от номинального значения.

Из соотношений (17) и (18) видно, что чем меньше отличается Z от номинального значения R_0, тем больше затухание несогласованности и тем ближе КСВ к единице (причем КСВ$\geqslant 1$). Для аттенюаторов с верхней рабочей частотой в несколько единиц мегагерц оговаривается затухание несогласованности, а для аттенюаторов, предназначенных для работы на более высоких частотах, — КСВ. Частично это объясняется тем, что на частотах свыше 10 *Мгц* возможно непосредственное измерение КСВ относительно простыми способами.

Между затуханием несогласованности и КСВ, как это следует из соотношений (17) и (18), существует следующая зависимость:

$$b_н = 20 \lg \frac{s + 1}{s - 1}. \qquad (19)$$

График, построенный в соответствии с этой формулой, позволяет легко переходить от затухания несогласованности к КСВ и наоборот (рис. 3). Зная КСВ или затухание несогласованности, можно определить крайние значения активной и реактивной составляющих входного и выходного сопротивлений аттенюатора. На основании соотношения (18) можно показать, что при данном КСВ активная составляющая входного (или выходного) сопротивления аттенюатора лежит в пределах

$$\frac{R_0}{s} \leqslant R \leqslant R_0 s, \tag{20}$$

а реактивная

$$0 \leqslant |X| \leqslant \frac{s-1}{\sqrt{s}} R_0. \tag{21}$$

Так, например, при КСВ=1,1 отклонение активной составляющей R входного и выходного сопротивлений аттенюатора не превышает 10% номинального значения R_0, а величина реактивной составляющей X не превышает $0{,}1\,R_0$. У современных аттенюаторов согласно паспортным данным КСВ во всем рабочем диапазоне не превышает 1,4. Необходимо учесть, что реальные КСВ всегда меньше величин, указанных в паспортных данных.

Перейдем теперь к рассмотрению построения аттенюаторов различных типов.

3. ПЕРЕМЕННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ НА РЕЗИСТОРАХ

Из переменных аттенюаторов на резисторах наибольшее распространение получили аттенюаторы со ступенчатой регулировкой затухания и резистивной связью между входом и выходом*. По своим техническим характеристикам они превосходят аттенюаторы других типов в диапазоне от нуля до сотен мегагерц. Нижней рабочей частотой таких аттенюаторов является постоянный ток, а верхняя рабочая частота лежит в пределах от сотен килогерц до 2 *Ггц*. Эти аттенюаторы обычно состоят из нескольких П-образных, Т-образных или Т-образно-мостовых звеньев (ячеек). Эти звенья, как и сами аттенюаторы, могут быть несимметричными (рис. 4,*а*, *б*, *в*) и симметричными (рис. 4,*г*—*е*) относительно корпуса (земли).

Изменение затухания аттенюаторов, выполненных на таких звеньях, осуществляется одним из следующих способов:

1. Изменением затухания звеньев.
2. Переключением звеньев или группы звеньев.
3. Использованием схемы цепного включения звеньев.

Изменение затухания звена может быть произведено путем изменения значений сопротивлений в Т-образно-мостовом звене, как показано на рис. 5. Преимущество изменения затухания в Т-образно-мостовом звене перед П- или Т-образным звеном заключается в том, что для изменения его затухания необходимо изменить значения только двух сопротивлений в звене, в то время как в П- и Т-образном звене пришлось бы изменить значения трех сопротивлений (рис. 4,*а*, *б*). Такой способ регулировки затухания заметно ухудшает частотные свойства звена (за счет увеличения распреде-

* Такие аттенюаторы называют также магазинами затуханий.

ленных емкостей) и поэтому применяется только в аттенюаторах с невысоким значением верхней рабочей частоты.

При втором способе установка необходимой величины затухания аттенюатора производится переключением звеньев (переключатель 0—10 *дб* на рис. 6) или группы звеньев (переключатель 0—60 *дб*). Группа звеньев применяется вместо одного звена для уменьшения частотной погрешности затухания при большом затухании

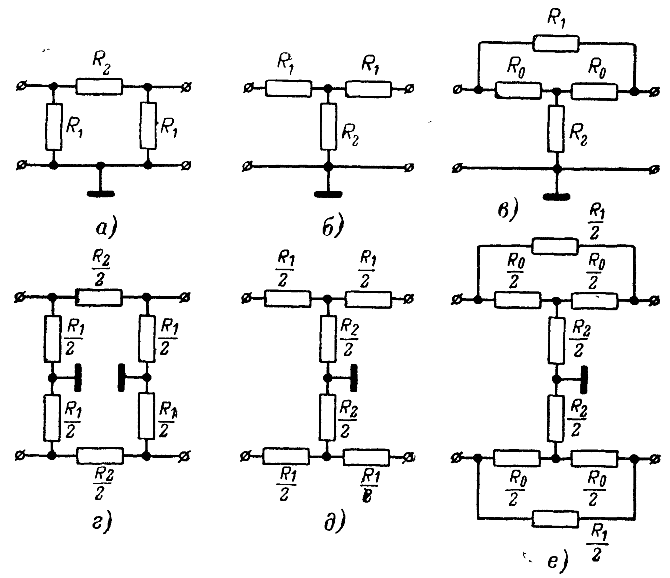


Рис. 4. Звенья аттенюаторов.

а — П-образное несимметричное; *б* — Т-образное несимметричное; *в* — Т-образно-мостовое несимметричное; *г* — П-образное симметричное; *д* — Т-образное симметричное; *е* — Т-образно-мостовое симметричное.

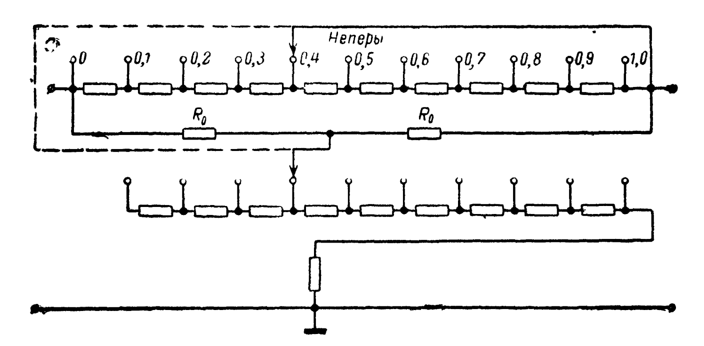


Рис. 5. Т-образно-мостовое звено с переменным затуханием.

в звене. Затухание аттенюатора определяется суммой затуханий включенных звеньев.

Способы коммутации звеньев, особенно в аттенюаторах с верхней рабочей частотой не более нескольких мегагерц, где распределенные емкости и индуктивности переключателя, соединительных проводов и самих резисторов не вносят существенных погрешностей в измерения, весьма разнообразны и зависят от возможностей пе-

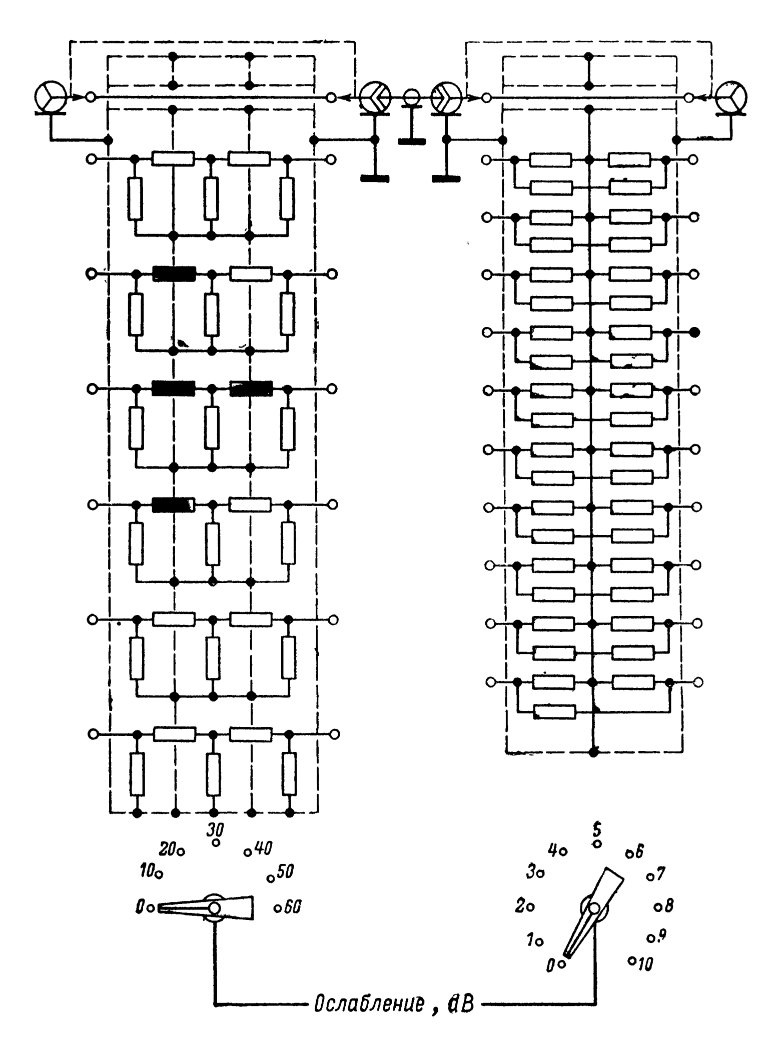


Рис. 6. Аттенюатор прибора XI-19; диапазон рабочих частот 0—1 *Ггц*.

реключателя. В качестве коммутируемых звеньев могут использоваться как П-, так и Т-образные звенья. Выбор того или другого звена обычно связан с конструкцией переключателя, так как звенья монтируются непосредственно на переключателе. Такой монтаж позволяет свести до минимума частотную погрешность за счет индуктивности и емкости соединительных проводников и тем самым расширить частотный диапазон аттенюатора.

Использование схемы цепного включения звеньев в аттенюаторе (рис. 7) позволяет обойтись более простым, а следовательно, и более дешевым переключателем, чем тот, который требуется при из-

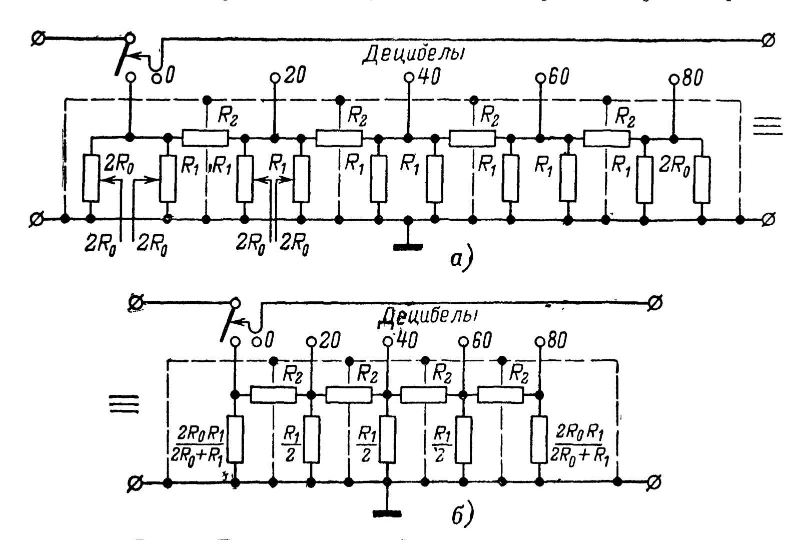


Рис. 7. Получение цепной схемы включения звеньев.

менении затухания звена (рис. 5) или при переключении звеньев (рис. 6). Цепная схема может быть составлена из нескольких П-образных (рис. 7) или Т-образных звеньев, которые рассчитываются исходя из величины волнового сопротивления $2R_0$, т. е. в 2 раза большего, чем волновое сопротивление аттенюатора R_0. Затухание звеньев выбирается одинаковым, хотя это и не обязательно.

Для обеспечения согласования первого и последнего звена цепной схемы на ее входе и выходе включается сопротивление $2R_0$. Поскольку входное и выходное сопротивления каждого звена (при нагрузке противоположного конца на $2R_0$) равно $2R_0$, то в точках соединения двух соседних звеньев сопротивление по отношению к корпусу («земле») равно R_0. Таким образом, сопротивление на всех контактах переключателя (по отношению к корпусу) равно волновому сопротивлению аттенюатора R_0 (рис. 7,*а*).

Параллельно включенные сопротивления обычно заменяют одним, и окончательно цепная схема принимает вид, показанный на рис. 7,*б*.

Установка требуемой величины затухания в аттенюаторах, градуированных в децибелах, чаще всего осуществляется двумя (реже

тремя) ручками, каждая из которых находится на оси соответствующего переключателя. В зависимости от положения ручки переключателя вводится соответствующее затухание, а отсчет затухания производится по положению ручек переключателя. Общее затухание, установленное на аттенюаторе, равно сумме затуханий, определяемых положением ручек аттенюатора. Таким образом, отсчетное устройство рассматриваемых аттенюаторов является чрезвычайно простым.

Наиболее часто один из переключателей (одна из ручек) аттенюатора имеет 11 положений (ступеней) и осуществляет изменение затухания через 1 *дб* в пределах от нуля до 10 *дб*. В этом случае второй переключатель аттенюатора производит переключение затухания через 10 *дб* (рис. 6), причем ступенчатое изменение затухания аттенюатора в приборе может производиться как одним из вышеназванных способов, так и другими. Например, регулировка затухания через 1 *дб* может осуществляться путем переключения звеньев, а через 10 *дб* — с помощью цепной схемы.

Число положений одного из переключателей определяется величиной максимального затухания аттенюатора. Так, например, при максимальном затухании аттенюатора в 70 *дб* (рис. 6) один из переключателей должен иметь 7 положений и изменять затухание аттенюатора от нуля до 60 *дб* через 10 *дб*. Если число положений второго переключателя 11, то затухание аттенюатора можно регулировать через 1 *дб* в пределах от нуля до 70 *дб*.

Иногда одним из переключателей аттенюатора производится изменение затухания через 1 *дб* в пределах от нуля до 20 *дб* (переключатель на 21 положение); тогда второй переключатель осуществляет переключение через 20 *дб*.

В аттенюаторах, градуированных в неперах, регулировка затухания осуществляется обычно тремя ручками, каждая из которых имеет 11 положений и изменяет затухание соответственно через 1 *неп*, 0,1 *неп* и 0,01 *неп*. Затухание такого аттенюатора изменяется от нуля до 11,1 *неп* через 0,01 *неп*.

В качестве переключателей чаще всего применяются переключатели барабанного или щеточного типа. Переключатель аттенюатора должен обладать очень высокой надежностью и выдерживать большое число переключений (не менее 10 000). Кроме того, емкости между контактами и корпусом («землей»), особенно в аттенюаторах с верхней рабочей частотой в сотни мегагерц, должны быть минимальными.

Звенья, изображенные на рис. 4, состоят из чисто активных сопротивлений. Реально в качестве сопротивлений звеньев используются проволочные или непроволочные резисторы, сопротивление которых, строго говоря, не является чисто активным за счет влияния собственных распределенных емкостей и индуктивностей. Необходимо также учесть распределенные емкости переключателя и индуктивность монтажа. Выясним влияние этих емкостей и индуктивностей на примере упрощенной эквивалентной схемы П-образного звена (рис. 8). В этой схеме C_1 — емкость, равная сумме емкостей резисторов горизонтального и вертикального плеча и емкости контакта переключателя по отношению к корпусу («земле»); C_2 — проходная емкость, равная сумме проходной емкости резистора горизонтального плеча звена и проходной емкости между контактами переключателя, к которым подключен этот резистор; L_1 и L_2 — рас-

пределенные индуктивности в вертикальном и горизонтальном плечах звена.

На основании этой схемы можно сделать вывод, что влияние распределенных емкостей и индуктивностей звена в начале рабочего диапазона отсутствует (это дает возможность при расчете звена положить собственную фазовую постоянную звена равной нулю). Поэтому погрешность затухания атенюаторов и отклонение величины волнового (а следовательно, входного и выходного) сопротивления от номинального значения в области низших и частично средних частот определяется исключительно отличием сопротивлений звена от требуемых значений, а также их временно́й нестабильностью.

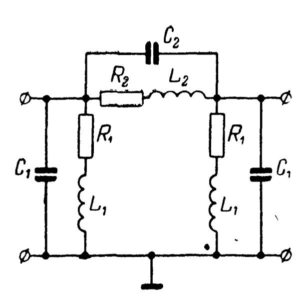


Рис. 8. Эквивалентная схема П-образного звена.

Однако с увеличением частоты и особенно вблизи верхней рабочей частоты, которая в основном и определяется влиянием распределенных реактивностей звена, появляется дополнительная (частотная) погрешность. Она выражается в частотной зависимости затухания, волнового сопротивления, а также собственной фазовой постоянной, которая уже не может быть принята равной нулю.

Если в звене используются проволочные резисторы, то распределенные реактивности звена зависят в основном от реактивностей резистора.

При сопротивлении резистора $R \gg \sqrt{L/C}$ (что имеет место, если в плече звена включен высокоомный резистор) основное влияние оказывает шунтирующее действие емкости. Эквивалентная схема такого плеча может быть представлена активным сопротивлением R, шунтированным емкостью C. Если $R \ll \sqrt{L/C}$ (низкоомный резистор), то основное влияние оказывает индуктивность. Эквивалентная схема такого плеча может быть представлена последовательным соединением активного сопротивления R и индуктивности L. Если $R \approx \sqrt{L/C}$, то до частоты $f \leqslant 0{,}3 f_0$, где $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$, полное сопротивление плеча будет чисто активным и равным R. Происходит это за счет взаимной компенсации реактивностей в плече звена.

У проволочных резисторов такую компенсацию можно осуществить путем выбора типа провода и соответствующей намотки, при которых собственная емкость и индуктивность резистора связаны с его требуемым сопротивлением соотношением $R \approx \sqrt{L/C}$. Специальные типы намоток позволяют в известных пределах варьировать индуктивность и емкость резисторов. Так, при бифилярной намотке (намотка проводом, сложенным вдвое) получается малая индуктивность при большой емкости. Плоская намотка (намотка на плоском каркасе с малой площадью поперечного сечения) позволяет получить малую индуктивность при небольшой емкости и т. д.

У современных непроволочных резисторов поверхностного типа (МЛТ, УЛМ, С2-10 и пр.) проходная емкость имеет величину порядка 0,1 *пф*, а индуктивность определяется в основном индуктив-

ностью выводов (индуктивность 1 *см* провода составляет около 0,01 *мкгн*). Распределенные емкости и индуктивности проволочных резисторов в сотни раз больше, чем в непроволочных. Поэтому верхняя рабочая частота в аттенюаторах на проволочных резисторах значительно ниже по сравнению с аттенюаторами на непроволочных резисторах и составляет несколько мегагерц.

В настоящее время аттенюаторы на проволочных резисторах в основном применяются только там, где требуется бо́льшая температурная и временна́я стабильность, а также бо́льшая точность, чем это обеспечивается аттенюаторами на непроволочных резисторах. Аттенюаторы с верхней рабочей частотой свыше 10 *Мгц* выполняются, как правило, на непроволочных резисторах. В качестве таких резисторов используются прецизионные резисторы типа С2-10, которые выпускаются с отклонением от номинала ±0,5% и ±1%, что позволяет устанавливать их в звенья без подбора. С увеличением затухания сопротивления резисторов в горизонтальном плече звена увеличиваются, также увеличивается и влияние проходной емкости в горизонтальном плече (см. рис. 8).

При затухании звена свыше 30 *дб* это влияние приводит к уменьшению затухания уже в начале метрового диапазона. По этой причине звенья с затуханием свыше 30 *дб* используются только в аттенюаторах с низким значением верхней рабочей частоты. Затухания свыше 30 *дб* обычно получают путем последовательного включения двух звеньев или путем использования цепной схемы (см. рис. 6 и 7).

Дополнительным источником частотной погрешности затухания аттенюатора являются емкостные связи между его входом и выходом, а также между отдельными звеньями. Эти связи приводят к уменьшению затухания с увеличением частоты и проявляются тем сильнее, чем больше величина затухания, установленная на аттенюаторе. Для устранения этих связей производится установка звеньев в отдельные отсеки или разделение звена экранирующей перегородкой (рис. 6 и 7). Второй способ является более совершенным, так как не только устраняет связь между звеньями, но и уменьшает частотную погрешность затухания звена.

Из приведенного анализа переменных аттенюаторов на резисторах следует, что исходными данными для их расчета являются частотный диапазон, волновое сопротивление, пределы изменения затухания и требуемая плавность регулировки (например, через 1 *дб*), а также погрешность аттенюатора. В соответствии с верхней рабочей частотой выбираются способы регулировки затухания и тип резисторов. Класс точности резисторов определяется заданной погрешностью аттенюатора.

После выбора способа регулировки затухания, исходя из данных о пределах изменения затухания и требуемой плавности его регулировки, становятся известными число звеньев, их затухание, а также требования к переключателю.

Звенья с изменяющимся затуханием (см. рис. 5), переключаемые звенья (рис. 6) и цепная схема (рис. 7) должны иметь то же волновое сопротивление R_0, что и аттенюатор. Звенья цепной схемы (рис. 7) для обеспечения волнового сопротивления этой схемы R_0 должны иметь волновое сопротивление $2R_0$.

Далее производится расчет звеньев. Расчетные формулы для звена получаются из приведенных выше выражений (11) и (12) путем определения сопротивлений холостого хода $Z_{x.x}$ и короткого

замыкания $Z_{кз}$ звена. В результате получаются следующие соотношения *:

для П-образного звена (рис. 4,*а* и *г*)

$$R_1 = \frac{R_0}{\operatorname{th}\frac{a}{2}}; \tag{22}$$

$$R_2 = R_0 \operatorname{sh} a; \tag{23}$$

для Т-образного звена (рис. 4,*б* и *д*)

$$R_1 = R_0 \operatorname{th}\frac{a}{2}; \tag{24}$$

$$R_2 = \frac{R_0}{\operatorname{sh} a}; \tag{25}$$

для Т-образного мостового (перекрытого) звена (рис. 4,*в* и *е*)

$$R_2 = \frac{R_0}{2}\left(\frac{1}{\operatorname{th}\frac{a}{2}} - 1\right); \tag{26}$$

$$R_1 = \frac{R_0^2}{R_2}. \tag{27}$$

При расчете звеньев затухание обычно известно в тех единицах, в которых градуируется аттенюатор. Если аттенюатор градуирован в неперах, то расчет звена производится по формулам (22)—(27). При градуировке аттенюатора в децибелах в формулах (22)—(27) в соответствии с соотношением (16) необходимо заменить величину a на 0,115 b.

В табл. 1 представлены значения сопротивлений R_1 и R_2 для П-образных и Т-образных звеньев при затуханиях от 1 до 20 *дб* и волновом сопротивлении 75 *ом,* рассчитанные по формулам (22)—(27). Из этих формул видно, что при любом другом волновом сопротивлении R_0 необходимо умножить значения сопротивлений, приведенных в табл. 1, на $R_0/75$. Например, если необходимо рассчитать звенья с волновым сопротивлением 50 *ом*, то следует умножить табличные значения сопротивлений на 0,667.

Кроме аттенюаторов со ступенчатой регулировкой затухания выпускаются также аттенюаторы с плавной регулировкой (например, Д2-17). Они работают в том же диапазоне частот, что и ступенчатые, однако более компактны. Их недостатком являются начальные потери (10—15 *дб*), а также погрешность установки затухания (около 1 *дб*).

Аттенюаторы с резистивно-емкостной связью между входом и выходом предназначены для работы в дециметровом диапазоне.

---

* Таблицы гиперболических функций sh и th приведены, например, в «Справочнике по математике для инженеров и учащихся втузов» И. Н. Бронштейна и К. А. Семендяева.

Таблица 1

b, дб	П-образное звено		Т-образное звено		Т-образно-мостовое звено	
	R_1, ом	R_2, ом	R_1, ом	R_2, ом	R_1, ом	R_2, ом
1	1 300	8,66	4,31	650	9,14	615
2	651	17,4	8,64	323	19,4	290
3	439	26,4	12,8	213	30,9	182
4	331	35,8	17,0	157	43,8	128
5	268	45,6	21,0	123	58,3	96,4
6	226	56,0	24,9	100	74,6	75,4
7	196	67,2	28,7	83,7	92,8	60,6
8	174	79,3	32,3	71,0	113	49,6
9	158	92,3	35,7	61,0	136	41,2
10	144	107	38,9	52,7	162	34,7
11	134	122	42,0	45,9	191	29,4
12	125	140	44,8	40,2	223	25,2
13	118	159	47,6	35,3	260	21,6
14	112	180	50,0	31,2	301	18,7
15	108	204	52,4	27,5	347	16,2
16	103	231	54,5	24,4	398	14,1
17	99,7	260	56,4	21,6	456	12,3
18	96,6	293	58,2	19,2	520	10,8
19	94,0	330	59,9	17,0	593	9,48
20	91,6	371	61,4	15,2	674	8,34

Примером аттенюатора такого типа может служить аттенюатор Д2-13. Его конструктивная и эквивалентная электрическая схема приведены на рис. 9.

Регулировка затухания в этих аттенюаторах производится путем изменения резистивно-емкостной связи при перемещении согла-

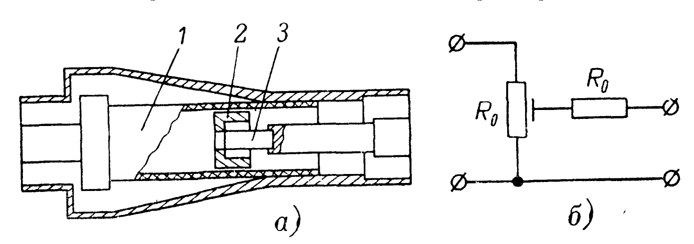


Рис. 9. Конструктивная схема аттенюатора с резистивно-емкостной связью типа Д2-13 (*а*) и его эквивалентная электрическая схема (*б*).

1 — резистор R_0 входной секции; *2* — плунжер; *3* — резистор R_0 выходной секции.

сующего экрана резистора выходной секции аттенюатора внутри полого цилиндрического резистора входной секции. Сопротивления обоих резисторов равны волновому сопротивлению аттенюатора. Пределы изменения затухания — от 10 до 40 *дб*, волновое сопротивление — 75 *ом*, диапазон частот — 0,5—3 *Ггц*.

4. ПЕРЕМЕННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ ПРЕДЕЛЬНЫЕ, ЕМКОСТНЫЕ И ИНДУКТИВНЫЕ

Переменные аттенюаторы предельного типа работают в диапазоне частот примерно от 10 *Мгц* до 10 *Ггц* и обычно имеют коаксиальный вход и выход, т. е. рассчитаны на подключение коаксиальных кабелей. Они состоят из собственно аттенюатора и отсчетно-приводной системы.

Собственно аттенюатор представляет собой отрезок волновода, т. е. полой трубы круглого или квадратного сечения, внутри которого располагаются возбуждающий и воспринимающий электроды.

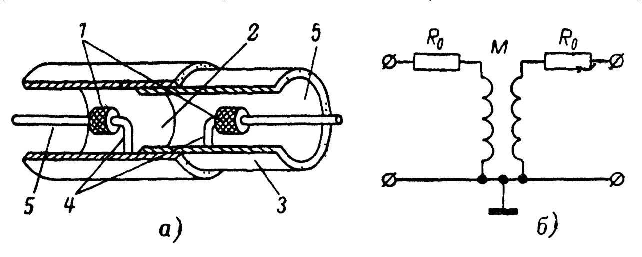


Рис. 10. Предельный аттенюатор индуктивного типа с использованием магнитного поля (*а*) и эквивалентный ему индуктивный аттенюатор (*б*).

1 — согласующие резисторы R_0; *2* — предельный волновод; *3* — плунжер; *4* — петли связи; *5* — коаксиальная линия.

Один из них может перемещаться относительно другого и тем самым изменять расстояние между электродами. Если электроды выполнены в виде петель (рис. 10,*а*), то в волноводе создается магнитное поле и возбуждается волна типа Н (магнитная). Если в качестве электродов используются диски (рис. 11,*а*) или штыри, то в волноводе создается электрическое поле и возбуждается волна типа Е (электрическая).

Сигнал, частота которого f меньше определенной (критической) частоты $f_{кр}$, претерпевает в волноводе затухание

$$b = 0,182 f_{кр} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{кр}}\right)^2}\, l \cdot 10^{-3}, \qquad (28)^*$$

где $f_{кр}$ — критическая частота волновода, *Мгц*; l — расстояние между электродами, *мм*.

Критическая частота зависит от формы и размеров поперечного сечения волновода (внутренних), а также от типа возбуждаемой волны.

При частоте сигнала $f < 0,2 f_{кр}$ затухание, как это видно из (28), становится постоянным и равным

$$b = 0,182 f_{кр} l \cdot 10^{-3}. \qquad (29)^*$$

Таким образом, изменяя расстояние между электродами, можно изменять затухание. Изменение расстояния между электродами про-

---

* Справедливо при затуханиях свыше 15 *дб*; при меньших затуханиях линейность нарушается.

изводится перемещением подвижного электрода относительно неподвижного (рис. 10,*а* и 11,*а*). Перемещение подвижного электрода осуществляется с помощью приводного механизма, который преобразует вращательное движение приводной ручки аттенюатора в поступательное движение плунжера с подвижным электродом, обеспечивая плавность хода плунжера и, следовательно, плавное изменение затухания. Поскольку рабочий ход плунжера невелик (десятки

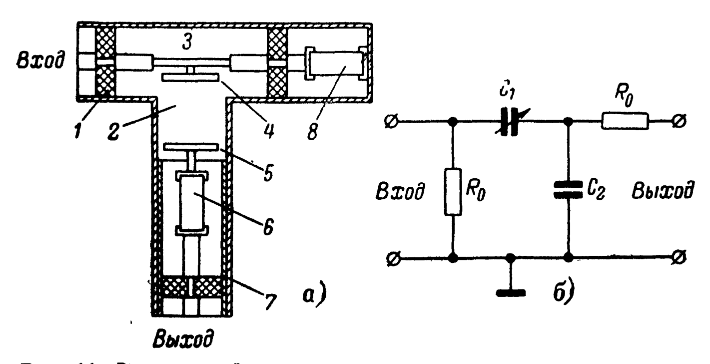


Рис. 11. Предельный аттенюатор емкостного типа с использованием электрического поля (*а*) и эквивалентный ему емкостный аттенюатор (*б*).

1 — диэлектрическая (опорная) шайба; *2* — предельный волновод; *3* — коаксиальная линия; *4* — возбуждающий электрод; *5* — воспринимающий электрод; *6* — согласующий резистор R_0 на выходе; *7* — плунжер; *8* — согласующий резистор R_0 на входе; C_1 — переменная емкость между возбуждающим и воспринимающим электродами; C_2 — емкость воспринимающего электрода на корпус.

миллиметров), то необходима точная фиксация линейных перемещений плунжера. Эту функцию выполняет отсчетный механизм, с помощью которого указанные перемещения передаются на отсчетное устройство аттенюатора.

Из сказанного следует, что предельный аттенюатор в механическом отношении представляет собой довольно сложную систему, что является его существенным недостатком.

При упрощении отсчетно-приводной системы появляются люфты и как их следствие значительные погрешности при установке затухания [см. формулу (29)]. Поскольку критическая частота определяется внутренним размером поперечного сечения волновода, то и этот размер должен быть выдержан с высокой точностью.

Преимуществом предельного аттенюатора является то, что его затухание может быть рассчитано только исходя из его геометрических размеров, а его точность определяется в основном точностью механической конструкции.

В электрическом отношении предельные аттенюаторы, использующие магнитное поле (электроды в виде петли), эквивалентны индуктивным аттенюаторам (рис. 10,*б*), а предельные аттенюаторы, использующие электрическое поле (электроды в виде дисков или штырей), эквивалентны емкостным аттенюаторам (рис. 11,*б*).

Рассмотрим работу предельного аттенюатора (рис. 11,*а*) исходя из схемы эквивалентного ему емкостного аттенюатора (рис. 11,*б*).

Такой аттенюатор представляет собой емкостный делитель, на входе и выходе которого включены сопротивления, равные волновому сопротивлению аттенюатора R_0. На основании схемы на рис. 11,*б* можно показать, что ослабление такого аттенюатора при согласованной нагрузке на выходе ($Z_н = R_0$) равно:

$$\frac{U_{вх}}{U_{вых}} = 2\sqrt{\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{2\omega C_1 R_0}\right)^2}. \qquad (30)$$

Как видно из выражения (30), ослабление практически не зависит от частоты (с погрешностью приблизительно 3%) и равно:

$$\frac{U_{вх}}{U_{вых}} = 2\left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right), \qquad (31)$$

если

$$1 + \frac{C_2}{C_1} \geqslant \frac{2}{\omega C_1 R_0}. \qquad (32)$$

Из неравенства (32) следует, что низшая рабочая частота аттенюатора $\omega_н$ должна удовлетворять условию

$$\omega_н \geqslant \frac{2}{(C_1 + C_2) R_0}. \qquad (33)$$

Для частот, меньших $\omega_н$, будет наблюдаться зависимость затухания от частоты [формула (30)].

Из рис. 11,*б* видно, что выходное сопротивление аттенюатора не будет отличаться от R_0 более чем на 3%, если сопротивление конденсатора C_2 на низшей рабочей частоте аттенюатора будет достаточно малым по сравнению с R_0, а именно:

$$\frac{1}{\omega_н C_2} \leqslant 4R_0. \qquad (34)$$

С другой стороны, для обеспечения входного сопротивления аттенюатора, равного R_0, емкость C_1 должна быть достаточно малой, чтобы пренебречь шунтирующим влиянием C_1 и C_2. Отклонение входного сопротивления аттенюатора не превысит 3% R_0, если сопротивление емкости C_1 на высшей рабочей частоте будет достаточно большим по сравнению с R_0, а именно:

$$\frac{1}{\omega_в C_1} \geqslant 4R_0. \qquad (35)$$

Из соотношений (33) — (35) следует, что

$$C_1 + C_2 \geqslant \frac{2}{\omega_н R_0}; \qquad (36)$$

$$C_2 \geqslant \frac{1}{4\omega_н R_0}; \qquad (37)$$

$$C_1 \leqslant \frac{1}{4\omega_в R_0}. \qquad (38)$$

Если учесть, что емкость C_1 является переменной, то из рассмотрения неравенств (36)—(38) вытекает:

$$C_{1\text{макс}} \leqslant \frac{1}{4\omega_{\text{в}} R_0}; \qquad (39)$$

$$C_2 \geqslant \frac{2}{\omega_{\text{н}} R_0} - C_{1\text{мин}}. \qquad (40)$$

Верхняя рабочая частота емкостного аттенюатора ограничена также влиянием собственной индуктивности конденсаторов и влиянием индуктивности их выводов. Вследствие влияния этих индуктивностей величина эквивалентной емкости C_ω конденсатора зависит от частоты и определяется формулой

$$C_\omega = \frac{C}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}, \qquad (41)$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad (42)$$

В этих формулах L — индуктивность конденсатора и его выводов; C — емкость конденсатора, измеренная на частоте, меньшей $0{,}1\,\omega_0$; ω_0 — частота последовательного резонансного контура (собственная резонансная частота конденсатора).

Из выражения (41) видно, что емкость конденсатора практически постоянна (с погрешностью 4%) до частоты $\omega_{\text{в}} \leqslant 0{,}2\,\omega_0$, причем чем больше емкость конденсатора, тем ниже его собственная резонансная частота ω_0 и частота, до которой его емкость практически постоянна, $\omega_{\text{в}}$.

Из выражений (39) и (40) видно, что $C_2 \gg C_{1\text{макс}}$, поэтому наиболее существенна частотная зависимость емкости конденсатора C_2, которая приводит к зависимости затухания аттенюатора от частоты [формула (31)].

Затухание аттенюатора в рабочем диапазоне частот практически не будет зависеть от частоты, если

$$\omega_{\text{в}} \leqslant 0{,}2\omega_0 = \frac{0{,}2}{\sqrt{L_2 C_2}}, \qquad (43)$$

т. е. если емкость конденсатора C_2 удовлетворяет условию

$$C_2 \leqslant \frac{0{,}04}{L_2 \omega_{\text{в}}^2}, \qquad (44)$$

где L_2 — индуктивность конденсатора C_2 и его выводов; $\omega_{\text{в}}$ — верхняя рабочая частота аттенюатора.

Таким образом, расчет емкостного аттенюатора производится на основании формул (31), (39), (40) и (44).

Предельные аттенюаторы емкостного типа уже на частотах порядка 100 *Мгц* в силу соизмеримости своих размеров с длиной волны не могут рассматриваться при расчете как система с сосредо-

точенными параметрами. Экран в этом случае выполняет не только свои обычные (экранирующие) функции, но и оказывает дополнительное влияние на передачу электрической энергии.

По этой причине приведенный анализ в количественном отношении является для предельных аттенюаторов емкостного типа приближенным, однако он очень хорошо отражает качественную сторону работы предельных аттенюаторов.

Верхняя рабочая частота емкостных аттенюаторов (так же, как и индуктивных) составляет примерно 100 *Мгц* *. Существенное повышение верхней рабочей частоты может быть получено только в предельных аттенюаторах. В предельных аттенюаторах емкостного типа конденсатор C_2 представляет собой емкость между воспринимающим электродом и корпусом (конструктивная емкость). Индуктивность такого конденсатора ничтожна, и поэтому собственная резонансная частота ω_0, а следовательно, и верхняя рабочая частота аттенюатора получаются очень высокими.

Недостатком емкостных, индуктивных и предельных аттенюаторов являются начальные потери, величина которых составляет 15—25 *дб* **.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ АТТЕНЮАТОРОВ

Как самостоятельные приборы переменные аттенюаторы наиболее часто используются для измерения усиления и затухания, а также измерения неравномерности АЧХ различных устройств (приемников, усилителей, отдельных каскадов, фильтров и т. п.). При этом достигаются следующие преимущества.

1. Усиление (затухание) или неравномерность АЧХ устройств определяются непосредственно по отсчетному устройству аттенюатора, что обеспечивает удобство и оперативность измерений.

2. Исключается частотная погрешность вольтметра, используемого при измерениях.

3. Появляется возможность заменить вольтметр простейшим индикаторным устройством (без ухудшения точности измерения).

4. Имеется возможность производить измерение усиления без применения генератора и вольтметра.

При отсутствии переменного аттенюатора для измерения или даже приближенной оценки величины усиления (затухания) необходим либо вольтметр, если измеряемое усиление (затухание) не превышает 20 *дб,* либо милливольтметр при измерении усиления (затухания) до 60 *дб.* Для измерения усиления (затухания) свыше 60 *дб* нужен еще более сложный (и, следовательно, более дорогой) прибор — селективный микровольтметр.

Измерение усиления и затухания без использования этих приборов может производиться согласно схеме на рис. 12, где *Г* — генератор; *А* — переменный аттенюатор; *П* — переходное устройство; *Д* — детектор; *И* — индикатор; *К* — коаксиальный кабель с волновым сопротивлением, равным волновому сопротивлению аттенюатора. Переходное устройство *П* (рис. 13) необходимо для создания

---

*В индуктивных аттенюаторах верхняя рабочая частота ограничена, в частности, емкостью катушек индуктивности.

** Это следует также из формулы (31), если учесть, что $C_2 \gg C_1$.

режима согласования на выходе аттенюатора, а также для обеспечения режима, близкого к режиму генератора напряжения ($R_г=0$) при подключении к любым точкам схемы, сопротивление между которыми не менее 70 *ом*.

Для обеспечения режима согласования на выходе аттенюатора входное сопротивление переходного устройства должно быть рав-

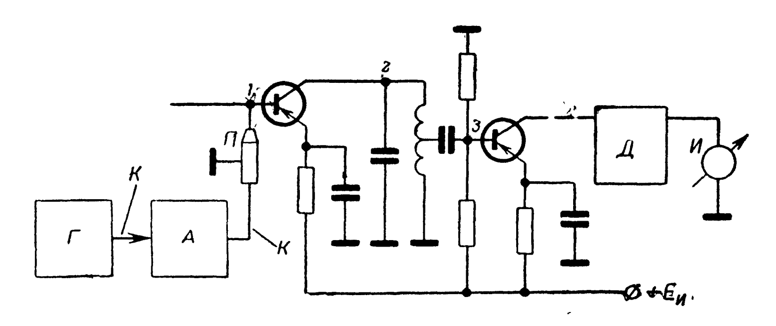


Рис. 12. Измерение усиления и затухания без использования вольтметра.

ным волновому сопротивлению аттенюатора и кабеля. Переходное устройство, показанное на рис. 13, имеет входное сопротивление 75 *ом* и рассчитано на работу с аттенюатором и кабелем, волновое сопротивление которых 75 *ом*.

Независимость напряжения на выходе переходного устройства (с точностью до 1 *дб*) при нагрузках свыше 70 *ом* достигается за счет низкого выходного сопротивления переходного устройства (около 7 *ом*). Для того чтобы не нарушать режима цепи по постоянному току при подключении к ней переходного устройства, в его схему введен разделительный конденсатор C_1. Емкость этого конденсатора определяет нижнюю рабочую частоту переходного устройства.

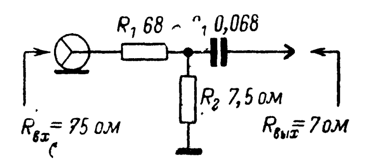


Рис. 13. Переходное устройство (пробник).

Верхняя рабочая частота ограничена влиянием индуктивности выходной цепи переходного устройства (точка подключения к измеряемой схеме, конденсатор C_1, резистор R_2). Для уменьшения этого влияния длина соединительных проводников в выходной цепи должна быть минимальной.

Конструктивно переходное устройство удобно выполнить в виде пробника, к которому подключается коаксиальный кабель. Для уменьшения размеров пробника и уменьшения индуктивности его выходной цепи сопротивление R_2 удобно составить из параллельного включения трех резисторов по 27 *ом* и одного подгоночного около 47 *ом* (все резисторы типа УЛМ). В качестве емкости C_1 удобно применить конденсатор типа КМ емкостью 0,068 *мкф*. Диа-

пазон рабочих частот такого переходного устройства приблизительно от 0,5 до 150 *Мгц*.

Индикатором может служить любой микроамперметр, подключенный к детектору (рис. 14).

Измерение усиления, например между точками *1* и *2* (рис. 12), производится следующим образом. Установив на генераторе *Г* частоту, на которой хотят произвести измерение, подключают пробник *П* к точке *1*. Регулируя выходное напряжение генератора или затухание переменного аттенюатора *А*, устанавливают стрелку индикатора *И*, включенного на выход усилителя, в некоторое положение α_0. Заметив затухание b_1, которое установлено на аттенюаторе, подключают пробник *П* к точке *2*.

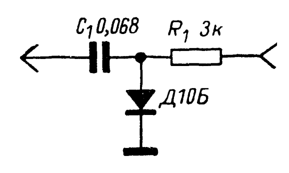


Рис. 14. Детектор.

Не изменяя выходного напряжения генератора, устанавливают на аттенюаторе такое затухание b_2, при котором стрелка индикатора *И* снова отклонится в прежнее положение α_0.

Тогда усиление *S* между точками *1* и *2* будет равно:

$$S = b_1 - b_2. \tag{45}$$

Аналогичным образом производится измерение затухания, например, между точками *2* и *3* схемы на рис. 12.

Однако в этом случае разность затуханий аттенюатора $b_2 - b_3$ получается отрицательной, что свидетельствует о затухании сигнала (по напряжению) при передаче от точки *2* к точке *3*.

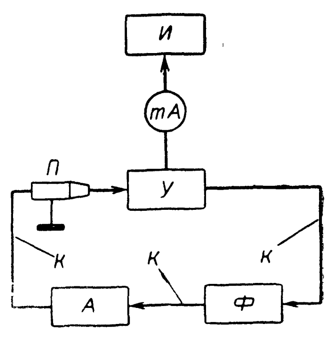


Рис. 15. Измерение усиления без применения генератора и вольтметра.

И — источник питания; *У* — усилитель; *А* — аттенюатор; *Ф* — фазовращатель; *П* — переходное устройство; *К* — коаксиальный кабель с волновым сопротивлением, равным волновому сопротивлению аттенюатора.

Блок-схема измерения усиления без использования генератора и вольтметра представлена на рис. 15. Идея этого метода состоит в переводе усилителя (или отдельного каскада) в режим самовозбуждения. Известно, что для самовозбуждения усилителя необходимо выполнить два условия:

1. Величина затухания цепи обратной связи, соединяющей вход и выход усилителя, должна быть меньше или равна величине усиления усилителя. Причем в момент возникновения или прекращения генерации, называемый порогом самовозбуждения, затухание цепи обратной связи численно равно усилению усилителя.

2. Фазовый сдвиг в петле обратной связи (усилитель и цепь обратной связи) должен составлять 360° *n* (где *n* — любое целое число), т. е. должна иметь место положительная обратная связь.

В пределах полосы пропускания (по уровню 6 *дб*) фазовый сдвиг, создаваемый усилителем, изменяется не менее чем на 120°. Дальнейший поворот фазы в петле обратной связи осуществляется фазовращателем, который должен изменять фазу на 180° и 360°.

Кроме того, потери, вносимые фазовращателем в цепь обратной связи, не должны превышать 1—2 *дб*. Примером такого фазовращателя может служить схема на рис. 16. При намотке трансформаторов фазовращателя $Тр_1$ и $Тр_2$ на ферритовых кольцевых сердечниках типа 2000НМ-1-15 размерами 5×3×1,5 проводом, сложенным вдвое (8 витков), обеспечивается удовлетворительная работа фазовращателя в диапазоне от 1 до 100 *Мгц*, если нагрузка фазовращателя лежит в пределах 50—75 *ом*. Для работы на более низких частотах необходимо использовать кольцевые сердечники с большим сечением магнитопровода и большими габаритами, соответственно увеличив число витков.

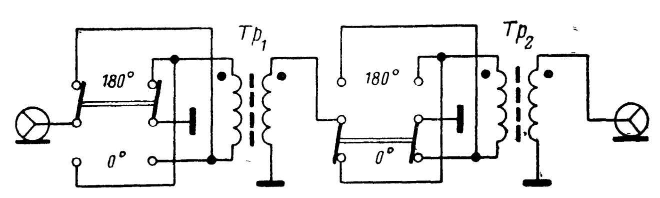


Рис. 16. Фазовращатель.

Измерение усиления в пределах полосы пропускания производится следующим образом. Установив на аттенюаторе *А* затухание 0 *дб*, а на фазовращателе *Ф* фазовый сдвиг 0°, замыкают петлю обратной связи (рис. 15). Если при этом возникает генерация (что в простейшем случае определяется по изменению тока, потребляемого усилителем *У*), то необходимо постепенно увеличивать затухание аттенюатора до прекращения (срыва) генерации. Затухание цепи обратной связи, при котором генерация прекратилась, равно усилению усилителя на частоте генерации.

Аналогичные измерения проводят при фазовом сдвиге фазовращателя в 180° и 360°. Наибольшая величина затухания цепи обратной связи, при которой наблюдается срыв генерации, равна величине усиления усилителя в пределах его полосы пропускания. Величина затухания цепи обратной связи определяется суммой затуханий аттенюатора и переходного устройства (рис. 13) *.

Затухание переходного устройства при любых нагрузках более 70 *ом* составляет 20 *дб*. Таким образом, возможно измерение усилителей с усилением не менее 26 *дб* (так как в пределах полосы пропускания усиление падает на 6 *дб*). При измерении усиления рассмотренным способом следует также учесть, что нагрузкой усилителя является входное сопротивление аттенюатора, равное 75 *ом*.

Применение переходного устройства является удобным, но не единственным способом обеспечения работы аттенюатора с несогласованной нагрузкой. Из соотношения (3) следует, что при затухании аттенюатора свыше 20 *дб* и любом сопротивлении нагрузки $Z_н$ (рис. 1)

$$\frac{U_{вх}}{U_{вых}} \approx 0{,}5K \left| 1 + \frac{R_0}{Z_н} \right|. \tag{46}$$

* Переходное устройство необходимо для тех же целей, что и в схеме рис. 12.

Погрешность этой формулы менее 10% при затухании аттенюатора свыше 10 *дб* и менее 1% при затухании свыше 20 *дб*.

Если определять напряжение на выходе аттенюатора не через напряжение на его входе, а так как это показано на рис. 17, то на основании теоремы об эквивалентном генераторе при любой нагрузке

$$\frac{U_0}{U_{вых}} = K \left| 1 + \frac{R_0}{Z_н} \right|. \qquad (47)$$

В формулах (46) и (47) K — ослабление аттенюатора в относительных единицах. Определяется K путем перевода показаний отсчетного устройства аттенюатора в относительные единицы.

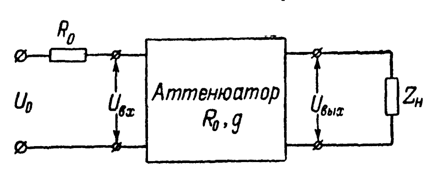


Рис. 17. Схема включения аттенюатора, позволяющая не принимать во внимание его фазовую постоянную при $Z_н \neq R_0$.

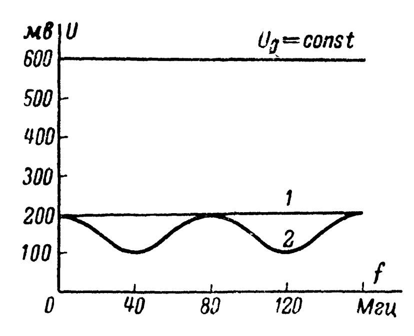


Рис. 18. Напряжения в схеме на рис. 17 при включении между выходом аттенюатора (R_0=75 *ом*) и нагрузкой ($Z_н$=150 *ом*) коаксиального кабеля (ρ=75 *ом*) длиной 1,2 *м*.

1 — напряжение на конце кабеля, соединенном с нагрузкой; *2* — напряжение на конце кабеля, соединенном с выходом аттенюатора.

Рассмотрим влияние соединительных кабелей, связывающих аттенюатор с источником сигнала и нагрузкой. Из уравнений (5) и (3) видно, что если коаксильный кабель согласован с нагрузкой, то входное сопротивление кабеля равно сопротивлению нагрузки, а напряжение на входе и выходе кабеля [1] одинаково. На основании тех же уравнений можно показать, что если кабель не согласован с нагрузкой, то при длине кабеля свыше 0,01 λ (λ — длина волны, соответствующая частоте, на которой производится измерение) входное сопротивление кабеля не равно сопротивлению нагрузки [2], а напряжения на входе и выходе кабеля могут сильно отличаться друг от друга. Объясняется это трансформирующими свойствами кабеля на высоких частотах, а также появлением стоячих волн в кабеле за счет отражения от нагрузки.

Согласно теории четырехполюсников аттенюатор вместе с подключенными к нему кабелями, волновое сопротивление которых равно волновому сопротивлению аттенюатора, может рассматриваться

[1] Для коротких кабелей, собственным затуханием которых на данной частоте можно пренебречь.

[2] Это имеет место и на более низких частотах, однако отличие обычно не столь существенно.

как эквивалентный аттенюатор, входом и выходом которого являются свободные концы подключенных кабелей.

Параметры эквивалентного аттенюатора следующие: волновое сопротивление то же, что и аттенюатора без кабелей, а собственное затухание и фазовая постоянная увеличиваются на величину собственного затухания и фазовой постоянной подключенных кабелей. Хотя эти величины известны из соответствующих справочников, учитывать их приходится редко, так как собственное затухание соединительных кабелей мало, а фазовая постоянная в большинство расчетных формул не входит.

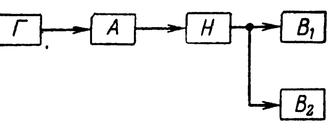


Рис. 19. Блок-схема калибровки милли- и микровольтметров.

Проиллюстрируем сказанное следующим примером. Пусть в схеме (рис. 17) $R_0=75$ *ом*, $b=6$ *дб*, $Z_н=150$ *ом*, $U_0=600$ *мв* и поддерживается постоянным в диапазоне от 0 до 160 *Мгц*. Согласно формуле (47) напряжение на нагрузке равно 200 *мв*.

Включим между аттенюатором и нагрузкой коаксиальный кабель длиной 1,2 *м* с волновым сопротивлением 75 *ом*. Рассматривая аттенюатор вместе с подключенным к нему кабелем как эквивалентный аттенюатор, выходом которого является конец кабеля, подключенный к нагрузке, применим к нему формулу (47).

Поскольку затухание кабеля мало, а фазовая постоянная в формулу (47) не входит, то напряжение в нагрузке не изменится. Однако напряжение на конце кабеля, подключенного к аттенюатору, вследствие появления стоячих волн в кабеле будет отличаться от напряжения в нагрузке (рис. 18).

Из других применений переменных аттенюаторов отметим их использование для калибровки милли- и микровольтметров, а также измерителей малых мощностей.

Принцип калибровки ясен из рис. 19, где обозначено; $Г$ — генератор; $А$ — переменный аттенюатор с волновым сопротивлением R_0; $Н$ — нагрузочное сопротивление R_0; B_1 — вольтметр; B_2 — калибруемый милли- или микровольтметр. Установив удобное для отсчета напряжение U_1 по вольтметру B_1, вводят затухание переменного аттенюатора и делают отметку на шкале калибруемого милли- или микровольтметра B_2.

Напряжение на выходе аттенюатора $U_{вых}$ связано с напряжением на его входе $U_{вх}$ следующей зависимостью:

$$U_{вых} = \frac{U_{вх}}{K},$$

где K — ослабление аттенюатора в относительных единицах.

Для перевода отношения двух величин, выраженного в децибелах (b), в относительные единицы (K) и обратно приведена табл. 2, построенная в соответствии с формулой (15) для $K \leqslant 10$ и $b \leqslant 20$ *дб*. Если $b > 20$ *дб*, то это затухание следует представить как

$$b = b_1 + 20n, \tag{48}$$

где $b_1 < 20$ *дб*, а n — целое число. Тогда

$$K = K_1 10^n, \tag{49}$$

где K_1 — число, соответствующее b_1 (определяется по табл. 2).

При обратном пересчете, если $K>10$, следует пользоваться формулой (49), причем n следует брать таким, чтобы K_1 было меньше 10. Зная K_1, определяют по таблице b_1 и по формуле (48) находят b.

Примеры: 1) $b=74$ *дб* $=14$ *дб* $+20\cdot3$ *дб*; $K=5\cdot10^3=5\,000$; 2) $b=28$ *дб* $=8$ *дб* $+20$ *дб*; $K=2{,}51\cdot10^1=15{,}1$; 3) $K=280=2{,}8\cdot10^2$; $b=9$ *дб* $+20\cdot2$ *дб* $=49$ *дб*.

Таблица 2

b, дб	*K*	*b, дб*	*K*	*b, дб*	*K*	*b, дб*	*K*
0,0	1,00	5,0	1,78	10,0	3,16	15,0	5,62
0,2	1,02	5,2	1,82	10,2	3,24	15,2	5,75
0,4	1,05	5,4	1,86	10,4	3,31	15,4	5,89
0,6	1,07	5,6	1,90	10,6	3,39	15,6	6,03
0,8	1,10	5,8	1,95	10,8	3,47	15,8	6,17
1,0	1,12	6,0	2,00	11,0	3,55	16,0	6,31
1,2	1,15	6,2	2,04	11,2	3,63	16,2	6,46
1,4	1,17	6,4	2,09	11,4	3,71	16,4	6,61
1,6	1,20	6,6	2,14	11,6	3,80	16,6	6,76
1,8	1,23	6,8	2,19	11,8	3,89	16,8	6,92
2,0	1,26	7,0	2,24	12,0	3,98	17,0	7,08
2,2	1,29	7,2	2,29	12,2	4,07	17,2	7,24
2,4	1,32	7 4	2,34	12,4	4,17	17,4	7,41
2,6	1,35	7,6	2,40	12,6	4,27	17,6	7,59
2,8	1,38	7,8	2,45	12,8	4,36	17,8	7,76
3,0	1,41	8,0	2,51	13,0	4,47	18,0	7,94
3,2	1,44	8,2	2,57	13,2	4,57	18,2	8,13
3,4	1,48	8,4	2,63	13,4	4,68	18,4	8,32
3,6	1,51	8,6	2,69	13,6	4,79	18,6	8,51
3 8	1 55	8,8	2,75	13,8	4,90	18,8	8,71
4,0	1,58	9,0	2,82	14,0	5,01	19,0	8,91
4,2	1,62	9,2	2,88	14,2	5,13	19,2	9,12
4,4	1,66	9,4	2,95	14,4	5,25	19,4	9,33
4,6	1,70	9,6	3,02	14,6	5,37	19,6	9,55
4,8	1.74	9,8	3,09	14,8	5,50	19,8	9,77

Обычно указанные операции при соответствующем навыке выполняются в уме. Для ориентации в пределах 0—20 *дб* полезно запомнить следующие соотношения между децибелами и относительными единицами (округлено с погрешностью менее 2%):

0 *дб* — 1; 3 *дб* — 1,41; 6 *дб* — 2;

10 *дб* — 3,2; 12 *дб* — 4; 14 *дб* — 5;

17 *дб* — 7; 18 *дб* — 8, 19 *дб* — 9; 20 *дб* — 10.

Тогда в случае необходимости промежуточные значения находятся путем линейной интерполяции (с погрешностью менее 5%).

Применение логарифмических единиц позволяет существенно упростить вычисления. Так, например, если усиление УПЧ должно быть не менее 72 *дб*, а усиление одного каскада составляет приблизительно 26 *дб*, то число каскадов УПЧ (N) определяется как частное от деления усиления УПЧ на усиление каскада (все в децибелах). Очевидно, что число каскадов равно трем, а ожидаемое уси-

ление УПЧ 26 *дб* • 3=78 *дб*. При использовании относительных единиц число каскадов находится из соотношения

$$20^N \geqslant 4\,000,$$

где N — целое число.

Применение встроенных переменных аттенюаторов в измерительной аппаратуре рассмотрим на примере измерительных генераторов и ИАЧХ. Встроенные переменные аттенюаторы в этих приборах устанавливаются таким образом, что выход аттенюатора является выходом прибора.

Напряжение на входе аттенюатора или перед сопротивлением, равным волновому сопротивлению аттенюатора (рис. 17) *, поддерживается постоянным с помощью ручной регулировки, а в более современных приборах (Г4-18А, XI-19, XI-27) автоматически (с помощью системы АРУ). При ручной регулировке на входе аттенюатора или перед сопротивлением R_0 (рис. 17) включается малочувствительный вольтметр переменного тока (так как напряжение, поступающее от выходной ступени генератора, достаточно велико и составляет 1—5 *в*). По этому прибору устанавливается исходное (опорное) напряжение, после чего можно производить отсчет напряжения на выходе генератора.

Градуировка аттенюаторов в генераторах иногда выполняется в относительных единицах (в виде множителей, кратных 10). Очень удобной является градуировка шкалы встроенного аттенюатора одновременно в значениях напряжения на выходе (при согласованной нагрузке) и децибелах. При этом максимальное напряжение принимается обычно за нуль децибел.

В качестве встроенных аттенюаторов в основном используются аттенюаторы на резисторах со ступенчатой регулировкой, емкостные и предельные. Некоторые генераторы снабжаются переходными устройствами (выносными делителями), аналогичными описанному выше.

Принципиально методика измерения со встроенными аттенюаторами не отличается от методики измерений с аттенюаторами, выполненными в виде самостоятельных приборов.

Следует лишь иметь в виду, что аттенюаторы в виде самостоятельных приборов обладают бóльшими возможностями и, как правило, более высокими техническими характеристиками, чем встроенные аттенюаторы, особенно в генераторах старых выпусков.

6. ЛЮБИТЕЛЬСКИЙ ПЕРЕМЕННЫЙ АТТЕНЮАТОР, РАБОТАЮЩИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 0 ДО 150 *Мгц*

Конструктивно аттенюатор выполнен в виде двух аттенюаторов, один из которых позволяет изменять затухание через 1 *дб* в пределах от 0 до 31 *дб*, а второй — через 20 *дб* в пределах от 0 до 100 *дб* (рис. 20 и 21). При измерениях оба аттенюатора включаются последовательно, причем общее затухание равно сумме затуханий включенных звеньев. Таким образом обеспечивается изменение затухания через 1 *дб* в пределах от 0 до 131 *дб*.

Каждый из аттенюаторов состоит из пяти П-образных звеньев (ступеней), которые могут быть включены в различных комбина-

---

* Второй способ является предпочтительным, так как устраняет влияние фазовой постоянной аттенюатора.

циях. Включение и выключение звеньев производится тумблерами, в качестве которых использованы тумблеры ТП1—2.

Конструктивно оба аттенюатора смонтированы в коробчатом шасси (объем камеры 45×35×15 *мм*), которое закрывается крышкой (рис. 22). Крышка крепится к шасси с помощью четырех винтов. На торцевых стенках шасси установлены розеточные разъемы, рассчитанные на подключение коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 *ом*. С помощью этих кабелей аттенюаторы соединяются между собой, а также с источником сигнала и нагрузкой.

В аттенюаторе со ступенями в 20 *дб* находятся четыре экрани-

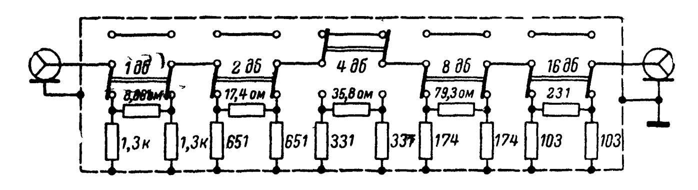


Рис. 20. Схема аттенюатора с затуханием от 0 до 31 *дб*; изменение затухания через 1 *дб*; R_0=75 *ом*.

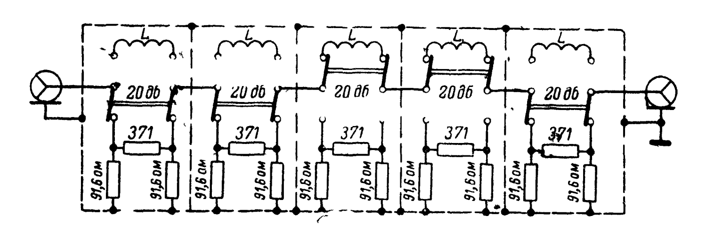


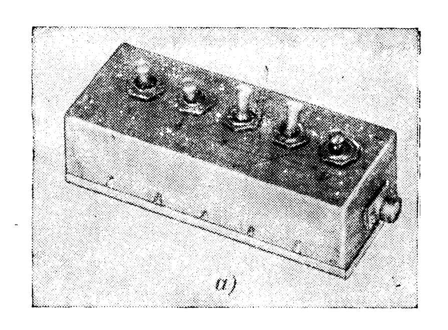
Рис. 21. Схема аттенюатора с затуханием от 0 до 100 *дб*; изменение затухания через 20 *дб*; R_0=75 *ом*.

рующие перегородки, которые отделяют П-образные звенья друг от друга. Перегородки припаяны к стенкам шасси. В каждой перегородке имеется отверстие диаметром приблизительно 5 *мм*, через которое проходит провод, соединяющий соседние звенья. Конструкция должна обеспечивать плотное прилегание крышки к шасси и экранирующим перегородкам по всему периметру, так как в противном случае при затухании аттенюатора свыше 40 *дб* на частотах, превышающих 50 *Мгц*, за счет паразитных связей между входными и выходными звеньями наблюдается подъем амплитудно-частотной характеристики (т. е. уменьшение затухания).

Экранирующие перегородки увеличивают распределенные емкости аттенюатора. Эти емкости определяются в основном распределенными емкостями тумблеров, которые зависят не только от конструкции тумблера, но и от близости его к корпусу. В положении *Выключено* (нулевое затухание) распределенные емкости и индуктивности аттенюатора образуют фильтр нижних частот с частотой среза (частота, на которой затухание возрастает до 3 *дб*) около 0,8 *Ггц* (аттенюатор без экранирующих перегородок) и 0,4 *Ггц*

(аттенюатор с экранирующими перегородками). Волновое сопротивление этого фильтра близко к 75 *ом*.

В аттенюаторе с экранирующими перегородками для улучшения волнового сопротивления аттенюатора на частотах свыше 100 *Мгц* в положении *Выключено* установлены корректирующие индуктивности ($L \approx 0{,}03$ *мкгн*). Они представляют собой 2 витка про-



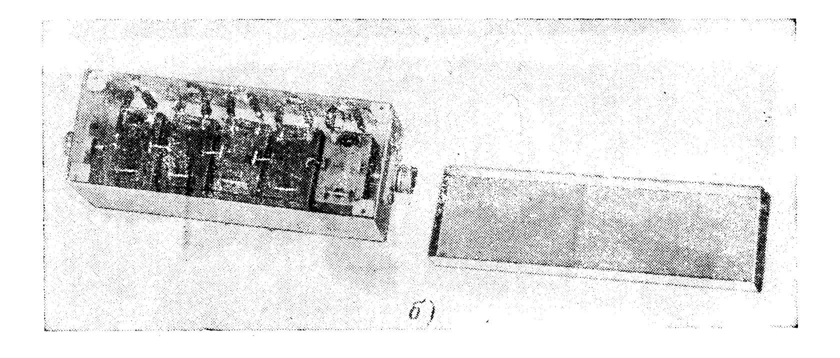


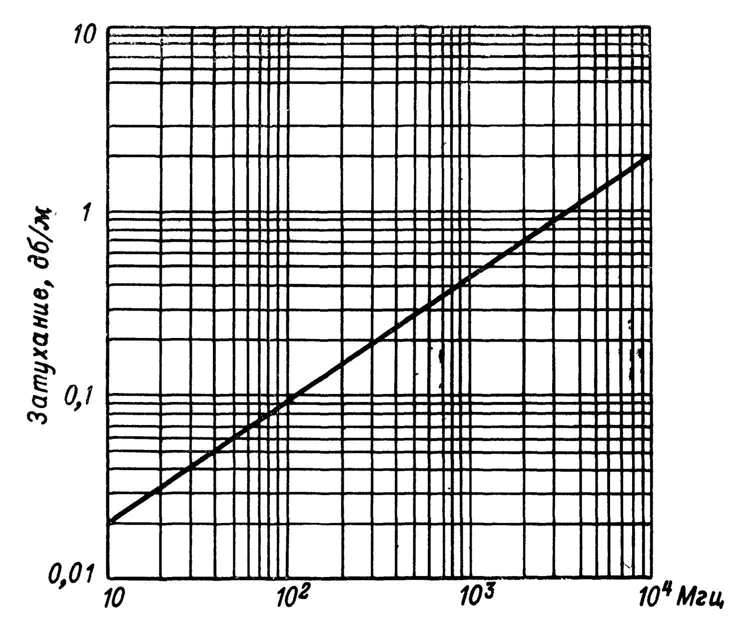
Рис. 22. Аттенюатор с затуханием от 0 до 31 *дб*.
а — внешний вид; *б* — вид со стороны монтажа.

вода диаметром около 1 *мм*. Намотка бескаркасная длиной 10 *мм*, диаметр витка 3 *мм*.

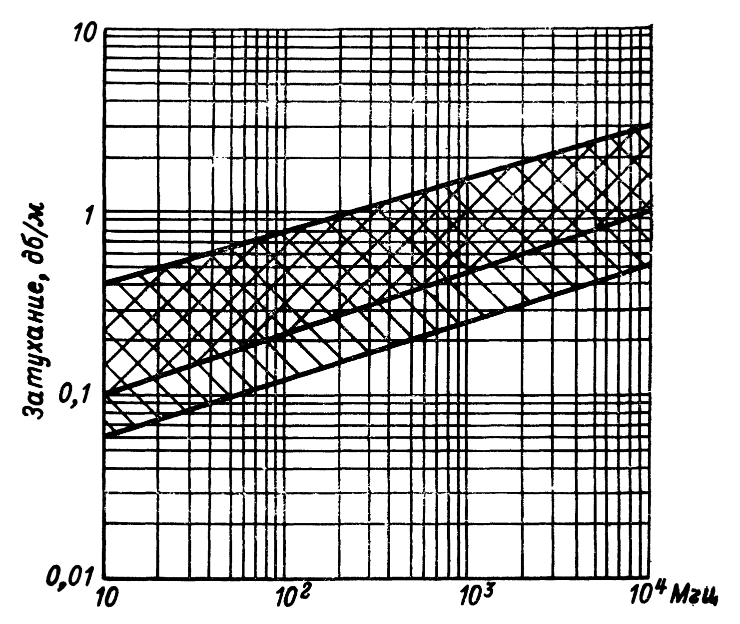
Аттенюаторы выполнены на резисторах типов МЛТ-0,25 и УЛМ. Длина выводов резисторов не должна превышать при монтаже 5 *мм*. Монтаж осуществляется непосредственно на тумблере. Сопротивления плеч звеньев подбираются по измерительному мосту типа МО-47 с точностью не хуже $\pm 1\%$. Причем для облегчения подбора большинство плеч выполнено из двух резисторов, сопротивления которых различаются приблизительно на один порядок.

Основные техиические данные аттенюаторов следующие: частотный диапазон 0—150 *Мгц*; волновое сопротивление 75 *ом*; КСВ $\leqslant$ $\leqslant 1{,}25$; максимальная погрешность затухания не более $\pm 0{,}4$ *дб* на каждые 20 *дб;* частотная погрешность затухания не более 10%; максимальное напряжение на входе не более 3 *в*.

Приложение 1



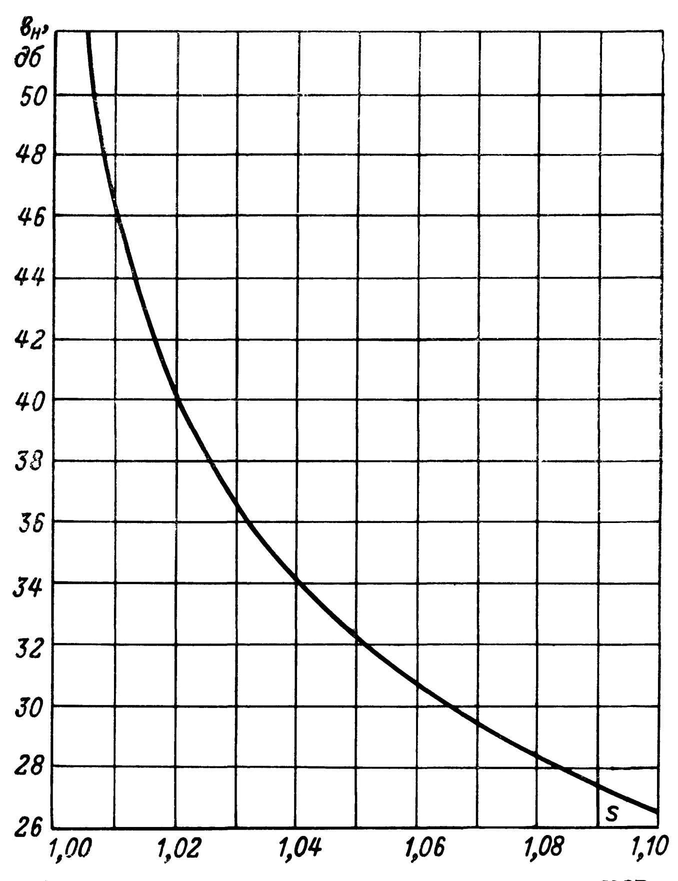
Типичная характеристика затухания коаксиального кабеля марки РК-75-4-11.



Затухание коаксиальных кабелей различных марок с волновым сопротивлением 50 и 75 *ом.*

Двойной штриховкой отмечен диапазон возможных значений затуханий для большинства марок кабеля.

Приложение 3



Связь между затуханием несогласованности и КСВ (при КСВ ≈ 1).

СОДЕРЖАНИЕ

Панин Николай Михайлович

Переменные аттенюаторы и их применение

Редактор *И. И. Мельниченко*
Обложка художника *А. А. Иванова*
Технический редактор *Л. Н. Никитина*
Корректор *И. Д. Панина*

Сдано в набор 22/I 1970 г. Подписано к печати 4/I 1971 г. Т-18753
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 2,1 Уч.-изд. л. 2,61
Тираж 30 000 экз. Цена 12 коп. Зак. 1156

Издательство „Энергия". Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10

Цена 12 коп.